第 37 卷第 21 期 生 态 学 报 Vol.37,No.21
2017 年 11 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201609021791
孙辉荣,刘旻霞,侯媛.甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫群落结构变化对不同坡向的响应.生态学报,2017,37(21):7304-7312.
Sun H R,Liu M X,Hou Y.Effect of different slope characteristics on the soil ciliate community structure in an alpine meadow in southern Gansu.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7304-7312.

# 甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫群落结构变化对不同坡向的响应

孙辉荣,刘旻霞*,侯 媛
西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

**摘要**:土壤纤毛虫不但是土壤生态系统的重要组成部分,而且是生态系统物质循环、能量流动过程的重要驱动因子。为了查明甘南亚高寒草甸不同坡向土壤纤毛虫群落特征,于 2015 年 7 月 21—26 日对同一山头的阳坡、半阳坡、西坡、半阴坡、阴坡五个坡向进行了调查。结果表明:(1)经"非淹没培养皿法"鉴定得到纤毛虫 142 种,隶属于 9 纲 18 目 32 科 55 属,各坡向物种数、个体数大小关系呈现出西坡>半阳坡>阳坡>半阴坡>阴坡;优势类群有旋毛纲、裂口纲、寡膜纲、肾形纲其优势度依次为 28.17%、19.72%、13.38%、12.68%。(2)不同坡向上土壤纤毛虫的物种数、个体数、Shannon 指数均具有显著性差异($P$<0.05),表明甘南亚高寒草甸生态系统中的土壤纤毛虫对于坡向这一微气候环境的变化具有敏感性。(3)各坡向土壤纤毛虫的物种数、个体数都具有明显的表聚性。(4)利用皮尔森相关性分析得出,在所测得的土壤理化因子中对纤毛虫的物种数、个体数均具有显著正相关($P$<0.05)的是全氮、有机质。综合分析,影响甘南亚高寒草甸不同坡向上土壤纤毛虫群落结构变化的主要因素为全氮、土壤有机质以及地上植被状况。

**关键词**:甘南亚高寒草甸;坡向;土壤纤毛虫;群落多样性

# Effect of different slope characteristics on the soil ciliate community structure in an alpine meadow in southern Gansu

SUN Huirong,LIU Minxia*,HOU Yuan
*Northwest Normal University,Geographic and Environmental Sciences,Lanzhou* 730070,*China*

**Abstract**: Soil ciliates are an important component of soil ecosystems and ecological systems, and are fundamental in material circulation processes and energy flow. To determine the effect of different slope directions on soil ciliate community characteristics in a South Gansu alpine meadow, five different slope characteristics—same hill slope, sunny slope, half-sunny slope, west slope, half-ngative slope, and shady slope to five slope—were investigated between July 21 and 26, 2015. The results showed that: (1) 142 species of ciliates, belonging to 9 classes representing 18 to 55 genera and 32 families across the different slopes were identified using the "non-flooded petri dish method", and the slope and relationships between species and individual size numbers were: west slope > half sunny slope > sunny slope > half-ngative slope > shady slope; spin polychaetes showed several advantages with split classes, a reduced membrane, and kidney-shaped outline, and showed a dominance of 28.17%, 19.72%, 13.38% and 19.72%, respectively, for the slopes above; (2) different slopes showed varying species and individual numbers of soil ciliates, and the Shannon diversity index was significantly different ($P$<0.05) between slopes, indicating that soil ciliates in Gansu alpine meadow ecosystems in South Asia were sensitive to microclimate changes on different slopes; (3) the slope to the species and individual number of soil ciliates showed obvious

**基金项目**:国家自然科学基金(31360114)
**收稿日期**:2016-09-02; **网络出版日期**:2017-07-11
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xiaminl@163.com

table cohesion; (4) the Pearson correlation analyses for soil physical and chemical factors and species and individual number of ciliates were significantly positively correlated ($P<0.05$), notably total nitrogen (TN) and organic matter; Therefore, a comprehensive analysis of the different influences in the Gansu alpine meadow on the south slope indicated that the main factors of soil ciliate community structure change were TN, the condition of soil organic matter, and ground vegetation.

**Key Words**: alpine meadow; in southerh Gansu; slope direction; soil ciliates; community diversity

土壤生态系统是一切陆生生物的载体,也是人类赖以生存的最重要的自然资源之一[1]。土壤纤毛虫是土壤生态系统的重要组成部分,在土壤微型生物食物链中占有重要位置,直接或间接参与土壤有机物的分解与转化,在土壤生态系统的能量流动与物质循环中发挥着重要作用;因此探明土壤动物与环境要素之间的相互关系对深刻认识土壤生态系统的运行机制、评价土壤生态系统功能具有重要意义[2]。纤毛虫是单细胞真核原生动物,具有个体微小、种类繁多、繁殖速度快、比表面积大、对环境反映十分灵敏等特点,因此可用土壤纤毛虫的环境效应参数(群落组成、丰度、多样性等)来评价、监测和预报土壤环境的变化[3]。

我国土壤纤毛虫物种多样性的研究起步较晚,国内与土壤纤毛虫有关的研究工作始于 20 世纪 80 年代,代表性的工作见于沈韫芬等[4]、宋微波等[5]、宁应之等[6-12],在这些工作中,涉及亚高寒草甸地区的很少。而对位于青藏高原东缘的拥有草原面积达 $2.723\times10^6$ $hm^2$ 的甘南州来说,关于亚高寒草甸不同坡向上土壤纤毛虫群落结构特征与土壤因子之间关系的工作还尚未有报道。

而本研究以甘南夏季不同坡向亚高寒草甸生态系统土壤纤毛虫为研究对象,旨在查明甘南亚高寒草甸生态系统中土壤纤毛虫的物种多样性以及群落与环境因子之间的关系。其研究结果一方面能够丰富我国西部地区自然小气候上土壤纤毛虫物种组成、群落特征等方面的基础资料,为亚高寒草甸退化、健康评价提供科学管理的理论依据;另一方面能够为该地区环境保护、生态旅游业的可持续发展以及经济发展提供基础资料。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区自然概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州合作市兰州大学亚高寒草甸与湿地生态系统研究站(34.55°N, 102.53°E),处于青藏高原东北边缘,属寒温湿润高原气候,海拔 2900—3050 m。据当地的气象资料显示该地年均降水 557.8 mm、年均蒸发量 1200 mm、年均气温 2.4℃。每年 6—8 月气候温暖湿润,降水集中,这期间的降水量可达到年降雨量的 60%左右;每年 12 月到次年 2 月为该区最冷月,平均气温-8.9℃。

表 1　不同坡向环境因子与植被概况

Table 1　From the environmental factors and vegetation in different situation

| 样地 Site | 海拔 Altitude/m | 坡向 Slope aspect/(°) | 地表温度 Tempeature/℃ | 土壤湿度 Moisture/% | 光照 Light/K | pH | 有机质 SOC/(g/kg) | 全氮 TN/(g/kg) | 全磷 TP/(g/kg) | 植被 Vegetation 丰富度 Richness | 盖度 Coverage |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阳坡 Sunny slope | 3034 | 187.3±3.76a | 26.9±3.11a | 17.7±0.42a | 666.48 | 8.2±0.35a | 39.4±3.01a | 5.3±0.31a | 0.54±0.03a | 18.0±1.08a | 62.8±2.29a |
| 半阳坡 Half sunny slope | 3032 | 254.0±1.53b | 18.6±2.24b | 25.2±0.42b | 632.1 | 8.0±0.22a | 44.4±2.38b | 5.8±0.15a | 0.65±0.04b | 27.3±1.37b | 74.3±0.85b |
| 西坡 West slope | 3031 | 310.3±1.33c | 20.5±1.98ab | 29.1±0.86c | 626.76 | 7.2±0.16b | 54.3±2.39b | 5.9±0.65a | 0.73±0.05c | 34.5±0.87c | 84.8±1.38c |
| 半阴坡 Half-ngative slope | 3038 | 12.0±4.04d | 21.6±1.99ab | 37.9±0.37d | 617.27 | 7.1±0.14b | 31.3±1.20a | 5.7±0.15a | 0.59±0.06a | 38.5±1.70d | 90.5±1.04d |
| 阴坡 Shady slope | 3042 | 33.0±2.89e | 22.2±2.15ab | 36.3±0.36e | 640.37 | 7.0±0.21b | 29.6±2.14a | 5.6±0.48a | 0.58±0.03a | 41.3±1.31d | 93.8±0.85d |

坡向依据正对正北方向然后依次按照顺时针方向旋转;SOC:有机质 Soil organic matter;TN:全氮 Total nitrogan;TP:全磷 Total phosphorus

土壤类型为亚高寒草甸土；植被类型为亚高山草甸，根据 2014 年 7 月 21—24 日调查发现，主要有优势植物三芒草（*Aristida adscensinis*）、矮嵩草（*Kobresia humilis*）、圆穗蓼（*Polygonaceae*）、金露梅（*Potentilla fruticosa* Linn），次优势种植物火绒草（*Artemisia desertorum* Spreng）、米口袋（*Gueldenstaedtia verna*）、多枝黄芪（*Astragaluspolycladus*）、鹅绒萎陵菜（*Potentilla anserina*）等。而随着坡向变化，地表植被的物种、覆盖度主要表现从阳坡到阴坡逐渐增加（表 1）。

**1.2** 样地设置和采样

样地设在试验站附近的一个阴阳坡向明显的山头，并于 2015 年 7 月 25、26 日，使用 360°电子罗盘测定不同坡向，根据所测数据将其依次划分为阳坡、半阳坡、西坡、半阴坡、阴坡 5 个坡向，每个坡向内取 5 个平行样点，测量其坡度及坡向（表 1）。5 个坡向内，西坡的坡度水平相对于其他坡向较平缓，各个坡向间差异显著，为后面的实验提供更好的依据。

同时严格按照坡向的变化，在每个坡向的中部选择（10 m×10 m）的样地，并将其平分为 4 小块。在每块小样内使用直径为 5 cm 的土钻根据"梅花五点法"分别取 0—5、5—15、15—25 cm 深度土壤（采样前要除去表面的新鲜掉落物和石块）装入自封袋，并做好标记，共取得土样 60 份带回实验室。与此同时还要测土壤温度、pH、土壤含水量等。样地具体情况见（表 1）。

**1.3** 室内工作与方法

**1.3.1** 样品培养与鉴定

将带回实验室的新鲜土样混合均匀，拣去草根以及石块后，称取 50 g 土样放在直径为 9 cm 的培养皿中，采用"非淹没培养皿法"[13]。也就是将土壤浸出液加入到培养皿中，使土壤完全湿润但不淹没，在 25℃左右的光照培养箱中进行培养。在培养后的第 3 天，使用光学显微镜进行物种观察与物种鉴定，而后每隔 3 d 镜鉴一次，直到没有新物种出现为止（每份土壤要经过多次培养）。鉴定技术包括活体观察和固定染色，固定染色技术采用 Fernandez-Galiano[14]、宋微波等[15]和 Wilbert[16]的方法，鉴定资料用尹文英等[17-18]、Foissner 等[19]，定量研究采用直接计数法[20]。

**1.3.2** 优势类群和优势种的划分

对鉴定的各级分类单元及物种进行统计，将物种数最多的 2 个目（*order*）定义为优势类群，次多的 2 个目定义为次优势类群，将单种的目定义为罕见类群[21]。对培养 4—14 d 各物种的出现频次和数量进行统计，将出现频次和数量统计结果最高的物种定义为优势种。

**1.3.3** 数据统计与分析

土壤动物群落多样性分析采用[22] Shannon-Weiner 物种多样性指数：$H = -\sum (P_i \ln P_i)$；Simpson 优势度指数：$C = \sum P_i^2$；Pielou 均匀度指数：$E = H/\ln S$；其中，$P_i = N_i/N$，$N$ 是样品中所有种类的总个体数 $N_i$ 是第 $i$ 种的个体数，$S$ 是样品中的类群数。根据上述公式计算出从阳坡到阴坡 5 个样地内土壤纤毛虫群落的物种多样性指数（$H$）、均匀度指数（$E$）和优势度指数（$C$）。

所有的数据最开始都是保存于 Excel 工作表中，运用 SPSS 18.0 进行数据分析、Origin 8.0 进行做图。

## 2 结果与分析

**2.1** 土壤纤毛虫物种组成

本次研究于 2015 年夏季在甘南亚高寒草甸展开，共鉴定到纤毛虫 142 种，隶属于 9 纲 18 目 32 科 55 属（附表 1）。

从群落结构来看（附表 1），旋毛纲（*Spirotrichea*）有 4 目 7 科 15 属 40 种，优势度为 28.17%，为第一优势类群；裂口纲（*Litostomatea*）有 1 目 4 科 10 属 28 种，优势度为 19.72%，为第二优势类群；异毛纲（*Hererotrichea*）最少，仅有 1 目 1 科 2 属 4 种占 2.82%。

**2.2**　土壤纤毛虫多样性动态

甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫群落各多样性指数在不同坡向上的变化见图 1。

在甘南亚高寒草甸夏季丛阳坡到阴坡土壤纤毛虫群落的物种数、个体数呈先增后减的趋势,且西坡最高,阴坡最少;土壤纤毛虫群落的 Shannon 指数($H$)、Simpson 指数($C$)和 Pielou 指数($E$)均呈现出波动变化的趋势;与此同时,在土壤表层(0—5 cm)不同坡向上的 Shannon 指数($H$)呈现出波动变化,而随着土壤深度的增加不同坡向上的 Shannon 指数($H$)相差不大(除阳坡之外)。统计分析结果(图 1) 显示土壤纤毛虫群落的物种数( $F$ =460.26,$P$<0.01) 、个体数( $F$ =161.63,$P$<0.01) 、Shannon 指数($F$ =7.028,$P$<0.05),均有显著的坡向变化,表明坡向变化对甘南亚高寒草甸夏季的土壤纤毛虫群落多样性有显著的影响。而 Simpson 指数( $F$= 1.52,$P$>0.05) 和 Pielou 指数($F$ =3.255,$P$>0.05)均与坡向变化无显著性相关,这可能是由于随着土层深度加深,土壤纤毛虫的香浓指数相差不大造成的(图 1)。

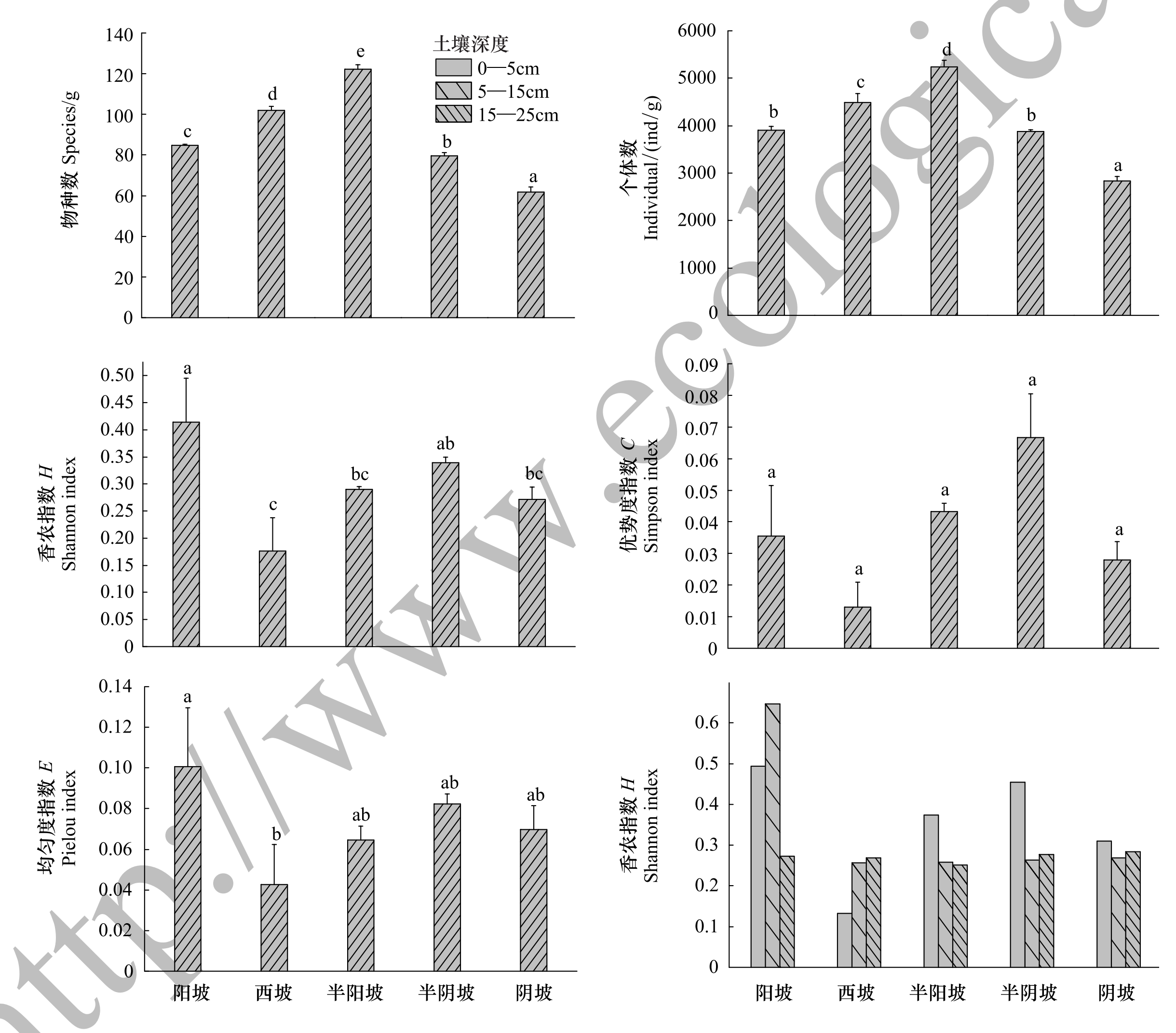



**图 1　甘南亚高寒草甸各坡向土壤纤毛虫群落多样性**(平均值±标准差)

**Fig.1　Gansu alpine meadow in south slope to the dynamic of soil ciliates community diversity**(Mean±SD)

**2.3**　土壤纤毛虫垂直分布动态

土壤纤毛虫的物种数和个体数总体上随土壤深度的增加而降低,不同坡向的垂直分布情况有一定差异(图 2)。在不同坡向上土壤纤毛虫物种数均有显著的垂直分布差异($P$<0.01),而个体数仅在阳坡、西坡、阴坡上有显著垂直分布差异,半阳坡、半阴坡在 5—15 cm 和 15—25 cm 间并没有显著差异。不同坡向上,各层土壤的物种数以西坡为最高,阴坡为最低;个体数同样也是以西坡为最高,阴坡为最低。方差分析结果表明,

同一土层的物种数和个体数在不同坡向间均有显著差异($P<0.01$),进一步的相关分析也表明 0—5 cm 层物种数、个体数均与土壤温度、坡度和光照无显著相关($P>0.05$),而与 TN 呈显著相关($P<0.05$)(表 2)。因此总体来看,影响甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫物种数与个体数垂直分布的因子可能是有机质、TN,但具体原因还有待研究。

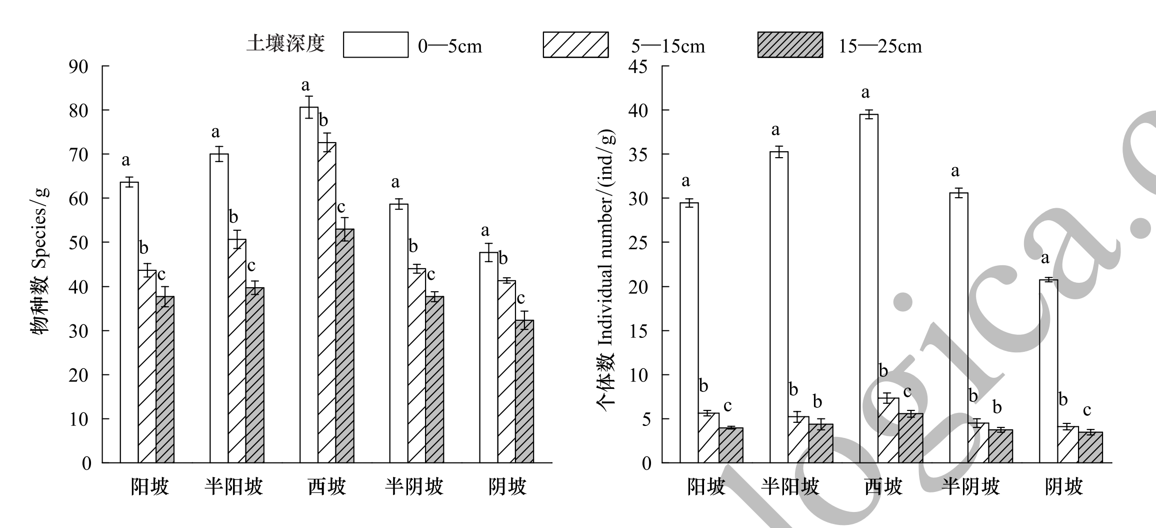



图 2 甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫垂直分布的坡向变化(平均值+标准差)

**Fig.2 Gannan alpine meadow in south slope from the change in vertical distribution of soil ciliates** (Mean±SD)

## 2.4 纤毛虫群落结构参数与环境因子之间的相关性

将纤毛虫群落结构参数与环境因子进行二元变量的皮尔森相关性分析,所得结果显示(表 2),纤毛虫物种数、个体数以及表层土壤纤毛虫物种数、个体数均与 SOC、TN 呈显著正相关($P<0.05$)。表明甘南亚高寒草甸夏季不同坡向上纤毛虫群落结构受土壤理化因子影响较大。

表 2 甘南亚高寒草甸纤毛虫的群落结构参数与土壤因子间的相关性分析

**Table 2 The correlation analysis between structural parameters of ciliates community and soil factors**

| 因子 Facter | 海拔 Altitude | 光照 Light | 土壤温度 Tem | 土壤含水量 Swc | pH | 有机质 SOC | 全氮 TN | 全磷 TP | 物种数 Sp | 个体数 In | 香农指数 *H* | 优势度指数 *C* | 均匀度指数 *E* | 0—5cm 物种数 $Sp^2$ | 0—5cm 个体数 $In^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sp | 0.263 | 0.272 | −0.411 | −0.368 | 0.212 | 0.969** | 0.944* | 0.848 | 1 | 0.988** | −0.249 | −0.069 | −0.4 | 0.993** | 0.969** |
| In | 0.275 | 0.306 | −0.379 | −0.351 | 0.22 | 0.927* | 0.968** | 0.799 | 0.988** | 1 | −0.173 | 0.048 | −0.326 | 0.990** | 0.993** |
| H | 0.274 | 0.51 | 0.900* | −0.234 | 0.1 | −0.226 | −0.09 | −0.539 | −0.249 | −0.173 | 1 | 0.596 | 0.986** | −0.159 | −0.207 |
| C | −0.392 | −0.146 | 0.209 | 0.465 | −0.503 | −0.222 | −0.024 | −0.074 | −0.069 | 0.048 | 0.596 | 1 | 0.55 | −0.05 | 0.061 |
| E | 0.251 | 0.467 | 0.931* | −0.193 | 0.098 | −0.37 | −0.232 | −0.665 | −0.4 | −0.326 | 0.986** | 0.55 | 1 | −0.311 | −0.355 |
| $Sp^2$ | 0.356 | 0.378 | −0.316 | −0.451 | 0.294 | 0.966** | 0.970** | 0.782 | 0.993** | 0.990** | −0.159 | −0.05 | −0.311 | 1 | 0.971** |
| $In^2$ | 0.277 | 0.296 | −0.423 | −0.328 | 0.242 | 0.885* | 0.971** | 0.773 | 0.969** | 0.993** | −0.207 | 0.061 | −0.355 | 0.971** | 1 |

** $P<0.01$ 极显著相关; * $P<0.05$ 显著相关; $Sp^2$($Species^2$):0—5 cm 物种数;$In^2$($Individual^2$):0—5 cm 个体数;Altitude:海拔;Light:光照;Tem(Temperature):土壤温度;Swc(soil Moisture):土壤含水量;SOC:有机质;TN(Total nitrogen):全氮;TP(Total phosphorus):全磷;Sp(Species):物种数;In(Individual):个体数;*H*(Shannon):香农指数;*C*(Simpson):优势度指数;*E*(Pielou):均匀度指数

## 2.5 不同坡向植被概况与纤毛虫群落特征的关系

图 3 可见,不同坡向上纤毛虫物种数、个体数与其所在地表植被状况具有很大的关系。从阳坡到阴坡随着植物丰富度以及覆盖度的逐渐增加,纤毛虫的物种数与个体数均表现出先增加后减少,并且随着植被盖度的增加纤毛虫的物种数与个体数均在半阳坡与西坡之间达到最大,且西坡与最大值最为接近;而随着植物物种数的增加西坡纤毛虫的物种数与个体数达到最大。因此能够看出西坡是最适合纤毛虫生存的生境。由此看出同一个区域内纤毛虫物种多样性的多寡与植被的丰富程度表现大体一致。

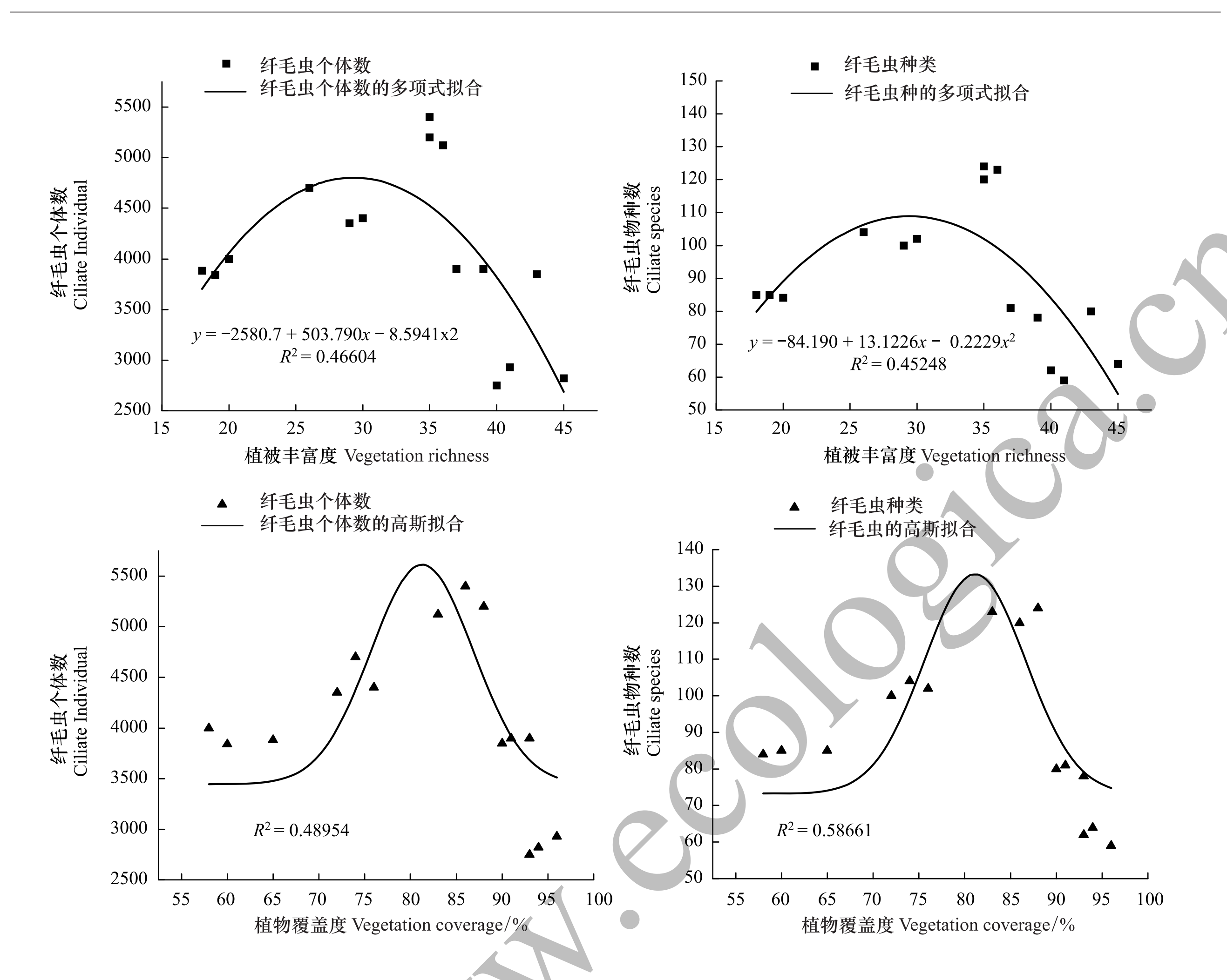



**图 3　不同坡向植被概况与纤毛虫物种数及个体数的关系**

**Fig.3　From the vegetation in different profiles and ciliate species and the relationship between the individual number**

$c$,$d$ 拟合曲线方程为 $y=y_0+\frac{A}{W\sqrt{\pi/2}}e^{\frac{-2(x-x_c)^2}{W^2}}$,$c$ 中 $y_0=3444.93836$, $x_c=81.27324$, $W=11.18394$, $A=30383.35072$, $R^2=0.48954$; $d$ 中 $y_0=73.2193$, $x_c=81.12357$, $W=11.05266$, $A=831.6472$, $R^2=0.58661$;其中 $a$,$b$ 横坐标 20 为阳坡、25—30 为半阳坡,35 为西坡,35—40 为半阴坡,40—45 为阴坡;$c$,$d$ 中 55—65 为阳坡,70—75 为半阳坡,80—90 为西坡,90—95 为半阴坡,92—97 为阴坡

## 3　讨论

### 3.1　坡向变化对土壤纤毛虫群落的影响

研究结果表明,随着坡向的变化,土壤纤毛虫的群落组成也随之发生变化,鉴定得到土壤纤毛虫物种数与个体数最多的为西坡,其次为半阳坡,阴坡最少。方差分析结果表明不同坡向土壤纤毛虫物种数、个体数均具有显著性差异($P$<0.01),这就表明坡向变化对甘南亚高寒草甸夏季土壤纤毛虫群落多样性有显著的影响。经相关性分析得到土壤纤毛虫物种数、个体数均与有机质、TN 呈显著正相关($P$<0.05)(表 2)。这一结果与宁应之等[23]的土壤湿度对土壤纤毛虫物种数影响最大,海拔对纤毛虫密度影响最大不同;与毛丽旦·艾泽孜等[24]研究的中小型土壤动物对土温和土壤含水量比较敏感,与已有研究表明土壤动物的个体密度与土壤容重和 pH 值呈负相关[25]不同,但与有机质、氮、磷和钾含量呈正相关[25-26]相一致。这可能是与本次研究的区域属于地域小气候,导致不同坡向上的气候因子差别不大(土壤含水量除外表 1),而相应使土壤理化因子、地表植被等因素变得更为重要。因为,微环境植物多样性和覆盖度越高,地表凋落物层就增加,土壤养分含量也提高,反之土壤中全氮、全磷、全钾和有机质等养分含量的减少可导致土壤动物类群数和密度的降低[27-28],而

本研究中半阴坡、阴坡俩个坡向尽管植被物种与覆盖度较高,但相比于其他 3 个坡向来说,其土壤含水量相对较高(表 1),影响了土壤有机质的转化与运输,最终影响到土壤纤毛虫的物种多样性,因为土壤含水量过高则抑制线虫[29]的数量。这与[30-32]研究者的研究结果相类似,而含水量成为间接影响因素(植被类型的多样性在很大程度上取决于土壤环境水热条件的差异)。

### 3.2 土壤纤毛虫垂直分布坡向动态

甘南亚高寒草甸生态系统中土壤纤毛虫物种数与个体数垂直分布均有一定的表聚性特征(图 2),并且不同坡向的表聚性程度是与纤毛虫的物种数、个体数保持相同趋势的。已有研究表明土壤动物的垂直分布一般受土壤理化性质和营养状况的影响[33]。草原生态系统 0 —10 cm 土层是植物根系的主要分布区,土壤相对疏松,通气性好,营养丰富,因而土壤动物相对增多[34]。植被结构和土壤理化性质是决定土壤动物垂直分布的相对稳定性因素[35];也有研究表明草原生态系统温度变化可对中小型土壤动物的垂直分布产生影响[36];而从本文 2.4 得到甘南亚高寒草甸不同坡向上纤毛虫物种数与个体数的垂直分布受有机质、TN 影响,与上述研究结果一致。但更为具体的影响甘南亚高寒草甸土壤纤毛虫垂直分布的因子及作用机理有待进一步的研究。

### 3.3 不同坡向土壤纤毛虫多样性指数比较

从图 1 能够看出,纤毛虫物种多样性指数与物种数、个体数之间并未表现出一致性。并且根据相关分析(表 2),纤毛虫多样性指数($H$)与均匀度指数($E$)呈显著正相关($P<0.01$);而优势度指数($C$)与均匀度指数、多样性指数与优势度指数之间并无显著正相关。这些与某一群落的 *Simpson* 优势度指数($C$)越低,其 *Pielou* 均匀度指数($E$)就越大,*Shannon* 物种多样性指数($H$)也就越高[37]不同。前者可能是因为阳坡地表裸露,光照强烈、坡度较大,水分不易保存,加之阳坡表层土壤只有 10 cm 左右,其下大部分属于石块,这使得表层纤毛虫有向下迁移的趋势,但是其能够生存的环境有限(图 1),最终导致表现不一致;后者一方面可能与纤毛虫物种多样性指数与均匀度指数均与温度呈显著性正相关($P<0.05$),另一方面可能与多样性指数的计算受到纤毛虫分类详细程度的影响造成的。

**参考文献(References):**


[1] 宁应之, 王娟, 刘娜, 马正学, 程晓. 甘肃天水麦积山风景名胜区土壤纤毛虫的物种多样性. 动物学研究, 2007, 28(4): 367-373.

[2] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利顶, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448.

[3] 宁应之, 王红军, 禹娟红, 杜海峰. 甘肃定西华家岭土壤纤毛虫群落对生态恢复的响应. 动物学研究, 2011, 32(2): 223-231.

[4] 沈韫芬, 刘江, 宋碧玉. 原生动物//尹文英, 杨逢春, 王振中. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.

[5] 宋微波. 长颈虫属两种土壤纤毛虫研究(动基片纲: 刺钩目). 动物分类学报, 1994, 19(4): 385-391.

[6] 宁应之, 沈韫芬. 珞珈山森林土壤原生动物生态学研究及土壤原生动物定量方法探讨. 动物学研究, 1996, 17(3): 225-232.

[7] 秦洁, 马正学, 刘有斌, 宁应之. 甘肃平凉麻武山土壤纤毛虫群落特征. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1566-1572.

[8] 宁应之, 武维宁, 杜海峰, 王红军. 土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应——以侧柏林为例. 生态学报, 2016, 36(2): 288-297.

[9] 宁应之, 沈韫芬. 中国土壤原生动物新纪录种(纤毛虫门: 寡膜纲). 动物学杂志, 1999, 34(6): 2-4.

[10] 宁应之, 王芳国, 杜海峰, 王红军, 苏苌. 甘南高原沼泽湿地秋季纤毛虫物种多样性及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2013, 32(3): 634-640.

[11] 宁应之, 沈韫芬. 土壤原生动物的区系特点 // 尹文英, 张荣祖, 殷绥公. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000: 209-220.

[12] 巴桑, 黄香, 普布, 马正学. 拉鲁湿地夏秋季纤毛虫群落特征及其与水环境的关系. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2740-2748.

[13] Foissner W. Soil protozoa: fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the literature. Progress in Protistology, 1987, 2: 69-212.

[14] Fernandez-Galiano D. Silver impregnation of ciliated protozoa: procedure yielding good results with the pyridinated silver carbonate method. Transactions of the American Microscopical Society, 1976, 95(4): 557-560.

[15] 宋微波, 徐奎栋. 纤毛虫原生动物形态学研究的常用方法. 海洋科学, 1994, (6): 6-9.

[16] Wilbert N. Eine verbesserte technik der Protargol-impragnation fur ciliaten. Mikrokosmos, 1975, 64: 171-179.

[17] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.

[18] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
[19] Foissner W, Agatha S, Berger H. Soil ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with emphasis on two contrasting environments, the Etosha Region and the Namib Desert. Denisia, 2002, 5: 1-1459.
[20] 宁应之, 沈韫芬. 土壤原生动物的采集 // 土壤动物研究方法手册编写组. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社, 1998: 56-72.
[21] 徐润林, 孙逸湘. 大鹏半岛土壤纤毛虫的群落特点. 应用生态学报, 2000, 11(3): 428-430.
[22] 陈德来, 马正学, 普布, 巴桑. 拉萨拉鲁湿地夏季土壤动物的群落特征. 动物学杂志, 2011, 46(5): 1-7.
[23] 宁应之, 武维宁, 刘汉成, 陈凌云. 甘南高原沼泽湿地春季纤毛虫群落结构特征. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2014, 50(2): 87-92.
[24] 毛丽旦·艾泽孜, 吾玛尔·阿布力孜, 苏来曼·阿布力克木, 阿提坎·吾布里喀斯木. 新疆艾比湖流域平原区不同生境中小型土壤动物群落多样性与相似性. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 104-109.
[25] 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 黄晶晶, 程序. 地埂植物篱对大型土壤动物多样性的影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5320-5329.
[26] 林英华, 杨学云, 张夫道, 古巧珍, 孙本华, 马路军. 长期施肥对黄土区农田土壤动物群落的影响. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1213-1218.
[27] Aspetti G P, Boccelli R, Ampollini D, Del Re A A M, Capri E. Assessment of soil—quality index based on microarthropods in corn cultivation in Northern Italy. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 129-135.
[28] Bedano J C, Domínguez A, Arolfo R. Assessment of soil biological degradation using mesofauna. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 55-60.
[29] 王邵军, 阮宏华, 汪家社, 徐自坤, 吴焰玉. 武夷山典型植被类型土壤动物群落的结构特征. 生态学报, 2010, 30(19): 5174-5184.
[30] Gutiérrez-López M, Jesús J B, Trigo D, Fernández R, Novo M, Díaz-Cosín D J. Relationships among spatial distribution of soil microarthropods, earthworm species and soil properties. Pedobiologia, 2010, 53(6): 381-389.
[31] Zhu X Y, Gao B J, Yuan S L, Hu Y C. Community structure and seasonal variation of soil arthropods in the forest-steppe ecotone of the mountainous region in northern Hebei, China. Journal of Mountain Science, 2010, 7(2): 187-196.
[32] Moghimian N, Habashi H, Kooch Y. Response of soil mesofauna to different afforested types in the North of Iran. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 2013, 3(4): 34-45.
[33] 邱丽丽, 殷秀琴. 左家自然保护区坡地土壤动物物种——多度分布格局研究. 土壤学报, 2006, 43(4): 629-634.
[34] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律. 草业学报, 2010, 19(5): 161-169.
[35] Adeduntan S A. Diversity and abundance of soil mesofauna and microbial population in south-western Nigeria. African Journal of Plant Science, 2009, 3(9): 210-216.
[36] 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 崔丽巍, 何先进, 熊远清. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化. 生态学报, 2011, 31(15): 4385-4397.
[37] 张雪萍, 侯威岭, 陈鹏. 东北森林土壤动物同功能种团及其生态分布. 应用与环境生物学报, 2001, 7(4): 370-374.

**附表 1　甘南亚高山草甸夏季纤毛虫群落结构**

**Community structure of ciliates in subalpine meadow in Gannan**

| 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 属 Genus | 种 Species | % |
|---|---|---|---|---|---|
| 异毛纲 Hererotricha | 异毛目 Hererotrichida | 旋口虫科 Spirostomidae | 1 | 1 | 2.82 |
| | | 赭虫科 Blepharismidae | 1 | 3 | |
| 旋毛纲 Spirotrichea | 游仆虫目 Euplotida | 游仆虫科 Euplotidae | 1 | 3 | 28.17 |
| | 排毛目 Sporadotrichida | 角毛科 Keronidae | 1 | 2 | |
| | | 卡尔科 Kahliellidae | 2 | 2 | |
| | 散毛目 Sporadotrichia | 弹跳科 Halteriidae | 1 | 1 | |
| | | 尖毛科 Oxytrichidae | 9 | 23 | |
| | | 管柱科 Trachelostylidae | 1 | 2 | |
| | 尾柱虫目 Urostylida | 尾柱虫科 Urostylidae | 3 | 7 | |
| 瓶纤纲 Armophorea | 瓶纤目 Armophorida | 扭头科 Metopidake | 1 | 3 | 2.11 |
| 裂口纲 Litostomata | 刺钩目 Haptorida | 斜吻虫科 Enchelyidae | 1 | 2 | 19.72 |
| | | 刀口虫科 Spathidiidae | 2 | 9 | |
| | | 管叶科 Trachelophyllidae | 4 | 8 | |
| | | 圆口虫科 Tracheliidae | 3 | 9 | |
| 篮口纲 Nassophora | 篮口目 Nassulida | 圆纹虫科 Furgasoniidae | 1 | 2 | 7.75 |

续表

| 纲 Class | 目 Order | 科 Family | 属 Genus | 种 Species | % |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 篮口科 Nassulidae | 2 | 3 | |
| | 侧口目 Pleurostomatida | 漫游科 Litonotidae | 1 | 1 | |
| | 小胸目 Microthoracidae | 小胸科 Microthoracidae | 2 | 4 | |
| | | 拟小胸科 Pseudomicrothoracidae | 1 | 1 | |
| 肾形纲 Colpodea | 肾形目 Colpodida | 肾形科 Colpodidae | 2 | 11 | 12.68 |
| | 篮环目 Cyrtolophosidida | 匙口科 Platyophryidae | 1 | 2 | |
| | | 篮环科 Cyrtolophosidae | 2 | 5 | |
| 前管纲 Prostomatea | 前管目 Prorodontida | 裸口虫科 Holophryidae | 1 | 4 | 7.75 |
| | | 前管虫科 Prorodontidae | 2 | 6 | |
| | | 斜板科 Plagiocampidae | 1 | 1 | |
| 寡膜纲 Oligohymen-ophorea | 帆口目 Pleuronematida | 膜袋科 Cyclidiidae | 1 | 6 | 13.38 |
| | | 康纤科 Cohnilemebidae | 1 | 3 | |
| | 嗜污目 Philaslasterida | 映毛虫科 Cinetochilidae | 1 | 2 | |
| | 四膜目 Tetrahymenida | 瞬目科 Glaucomidae | 1 | 2 | |
| | | 四膜科 Tetrahymenidae | 1 | 2 | |
| | 固着目 Sessilida | 钟虫科 Vorticellidae | 1 | 4 | |
| 叶咽纲 Phyllopharyngea | 齿管目 Chlamydodontida | 斜管科 Chilodonellidae | 2 | 8 | 5.63 |
| 合计 9 纲 | 18 目 | 32 科 | 55 | 142 | 100 |